

ANGULAR DISPERSED LIGHT SPATIAL INTERFERENCE TOMOGRAPHIC IMAGING APPARATUS

Publication number: JP2001272332 (A)

Publication date: 2001-10-05

Inventor(s): CHAN KINPUI; TANNO NAOHIRO +

Applicant(s): JAPAN SCIENCE & TECH CORP; CHAN KINPUI; TANNO NAOHIRO +

Classification:

- international: A61B10/00; G01B11/24; G01N21/17; G01N21/45; (IPC1-7): A61B10/00; G01B11/24; G01N21/17; G01N21/45

- European:

Application number: JP20000082509 20000323

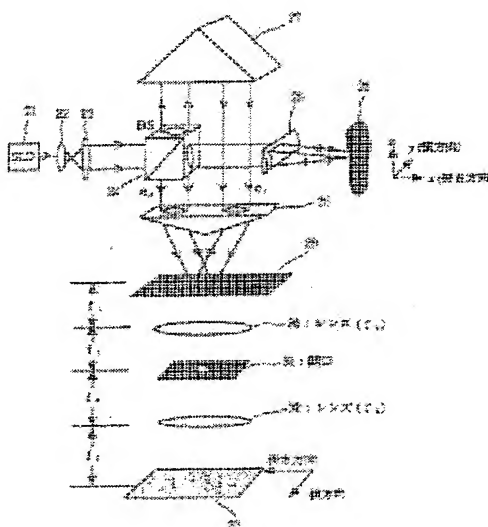
Priority number(s): JP20000082509 20000323

Also published as:

JP3619113 (B2)

Abstract of JP 2001272332 (A)

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an angular dispersed light spatial interference tomogram imaging device, capable of effectively executing optical coherence tomographic image measurement in a spacial area. **SOLUTION:** This tomographic imaging apparatus has a light source 21, having a broadband spectral width; an interference optical system dividing an emitted light beam into two, i.e., signal light advancing via a test object 26 and reference light advancing via an optical path different from the signal light, and spatially crossing the signal light from the test object 26 and the reference light to cause interference; an optical image forming system having an angular dispersing element disposed in a plane where the signal light are superimposed on the reference light, forming images of the signal light and the reference light which are transmitted through or reflected by the angular dispersing element on a detection face; a photosensor array 33 receiving the image-formed interference light and outputting a light detected signal, having plural photodetector elements individually outputting light reception signals; and a signal processing system integrating the plural light reception signals outputted from the photosensor array 33 and generating a signal which corresponds to each point of interest on a propagation path, inside the test object 26 or on the surface thereof.



Data supplied from the *espacenet* database — Worldwide

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2001-272332
(P2001-272332A)

(43)公開日 平成13年10月5日(2001.10.5)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード*(参考)
G 0 1 N 21/17	6 2 0	G 0 1 N 21/17	6 2 0 2 F 0 6 0
	6 3 0		6 3 0 2 G 0 5 9
A 6 1 B 10/00		A 6 1 B 10/00	E
G 0 1 B 11/24		G 0 1 N 21/45	A
G 0 1 N 21/45		G 0 1 B 11/24	D
審査請求 未請求 請求項の数11 O L (全 12 頁)			

(21)出願番号 特願2000-82509(P2000-82509)

(22)出願日 平成12年3月23日(2000.3.23)

(71)出願人 396020800

科学技術振興事業団

埼玉県川口市本町4丁目1番8号

(71)出願人 500130081

チャン キンパイ

山形県山形市城西町5-27-12

(71)出願人 000209588

丹野 直弘

山形県山形市松見町15番27号

(72)発明者 チャン キンパイ

山形県山形市城西町5-27-12

(74)代理人 100089635

弁理士 清水 守

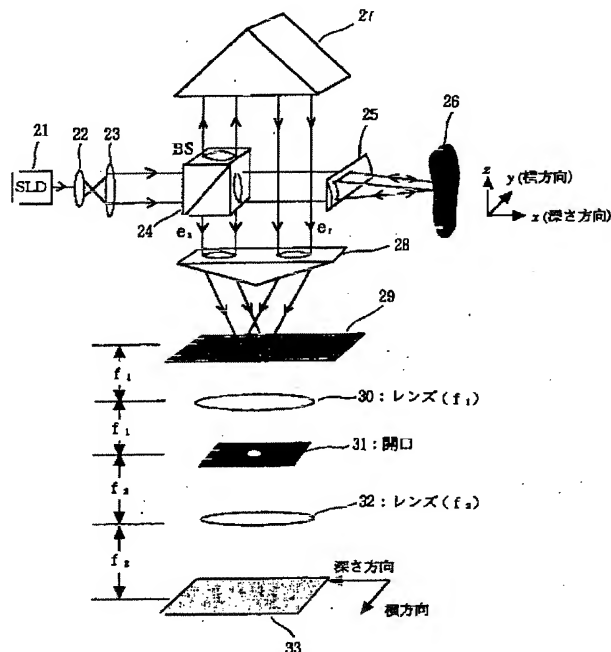
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 角分散光空間干渉断層画像化装置

(57)【要約】 (修正有)

【課題】 光コヒーレンス断層画像計測を有効に空間領域で行うことのできる角分散光空間干渉断層画像化装置を提供する。

【解決手段】 広いスペクトル幅をもつ光源21と、出射された光ビームを、被検体26を経由する信号光と、このとは異なる光路を経由する参照光とに二分するとともに、被検体を経由した信号光と、参照光を空間的に交差させ干渉させる干渉光学系と、信号光と参照光が重畳する面上に角分散素子を配置し、この角分散素子を透過もしくは反射する信号光および参照光を検出面に結像する光学結像系と、結像した干渉光を受光して光検出信号を得る光センサアレイ33と、この光センサアレイ33が、独立に受光信号を得る複数の受光素子を有するものであり、さらに、光センサアレイ33で得られた複数の受光信号を統合して被検体26の表面もしくは内部の、信号光の伝搬経路上の各関心点に対応する信号を生成する信号処理系とを具備する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 (a) 広いスペクトル幅をもつ光ビームを出射する光源と、(b) 該光源から出射された光ビームを、被検体が配置される被検体配置位置を経由する信号光と、該被検体配置位置を経由する光路とは異なる光路を経由する参照光とに二分するとともに、前記被検体配置位置を経由した後の信号光と、前記異なる光路を経由した参照光を空間的に交差させることにより、互いに重畳する面上において干涉光を生成する干涉光学系と、

(c) 前記信号光と前記参照光が重畳する面上に角分散素子を配置し、該角分散素子を透過もしくは反射する前記信号光および前記参照光を検出面上にて結像する光学結像系と、(d) 前記光学結像系で結像した干涉光を受光することにより光検出信号を得る光センサと、(e) 該光センサが、空間的に配列され、それぞれが独立に受光信号を得る複数の受光素子を有するものであり、さらに、前記光センサで得られた複数の受光信号を統合して前記被検体配置位置に配置された被検体の表面もしくは内部の、前記信号光の伝搬経路上の各関心点に対応する信号を生成する信号処理系とを具備することを特徴とする角分散光空間干涉断層画像化装置。

【請求項2】 前記干涉光学系が軸外シマイケルソン干涉計を用いることを特徴とする請求項1記載の角分散光空間干涉断層画像化装置。

【請求項3】 前記角分散素子が回折格子であり、該回折格子によって1次回折されて出射する前記信号光の中心波長成分と前記参照光の中心波長成分がともに零度もしくは零度に近い出射角をもつことを特徴とする請求項1記載の角分散光空間干涉断層画像化装置。

【請求項4】 前記干涉光学系が前記被検体へ入射する光ビームを該光ビームの入射方向と垂直する横方向上線状に絞るために円柱レンズを用い、さらに、該円柱レンズを用いて前記被検体を経由した信号光を集光することを特徴とする請求項1記載の角分散光空間干涉断層画像化装置。

【請求項5】 前記光センサが、空間的に2次元配列され、それぞれが独立に受光信号を得る複数の受光素子を有するものであり、前記光センサの一方向上で得られた複数の受光信号を統合して前記信号光の伝搬方向上の各関心点に対応する信号を生成するとともに、前記光センサの他の一方向上で得られた複数の受光信号を総合して、前記信号光の伝搬方向と垂直する横方向上の各関心点に対応する信号を生成する信号処理部を構えたことを特徴とする請求項4記載の角分散光空間干涉断層画像化装置。

【請求項6】 前記干涉光学系が、前記参照光と前記信号光の周波数を相対的にシフトさせる周波数シフタを備えることを特徴とする請求項1記載の角分散光空間干涉断層画像化装置。

【請求項7】 前記干涉光学系が、被検体への入射光の

偏光方向を制御する偏光素子を備えることを特徴とする請求項1記載の角分散光空間干涉断層画像化装置。

【請求項8】 前記光源が、可干渉距離100 μ m以下のスーパーミネセントダイオードであることを特徴とする請求項1記載の角分散光空間干涉断層画像化装置。

【請求項9】 前記光源が、可干渉距離100 μ m以下の発光ダイオードであることを特徴とする請求項1記載の角分散光空間干涉断層画像化装置。

【請求項10】 前記光源が、パルス幅1ピコ秒以下の超短パルスレーザーであることを特徴とする請求項1記載の角分散光空間干涉断層画像化装置。

【請求項11】 前記被検体が光散乱媒質であることを特徴とする請求項1記載の角分散光空間干涉断層画像化装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、被検体、特に光散乱媒質に光ビームを照射し、その被検体の表面もしくは内部から反射した光を利用して、その被検体の光画像計測を行う角分散光空間干涉断層画像化装置に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、レーザー光源などを用いた光画像計測技術は、安全であること、すなわち脱放射線化、脱アイソトプ化であることから、既存のX線を用いた画像計測分野への応用が試みられている。中でも、光による生体画像計測は有望な応用分野として期待されている。しかし、例えば人体や生体組織のような不均一な構成物質をもつ試料(被検体)は、その内部で光を顕著に多重散乱するために、その内部形態は一般的には不可視である。こうした散乱媒質を光計測する場合の最大難点は、被検体から四方八方に出射する透過光あるいは反射光のうち追跡が可能な光路を辿った信号光をどのようにして抽出するかということにある。これを可能にする方法の1つとして、優れた距離分解能をもつ光コヒーレンス断層画像化法が挙げられる〔例えば、丹野直弘、‘光学’、28巻3号、116(1999)参照〕。

【0003】光コヒーレンス断層画像化法は広帯域なスペクトル幅を持つ光源の時間領域の低コヒーレンス性(空間領域で短い可干渉距離とも表現する)に着目して、干涉計において生体内部からの反射光波を μ mオーダーの距離分解能で検出する方法である。

【0004】図10にマイケルソン干涉計を用いた光コヒーレンス断層画像計測装置の基本構成を示す。

【0005】この図に示すように、低コヒーレンス光源(SLD)201からの光ビームを半透明鏡202によって2分割する。一方の光ビームに、例えばピエゾ素子203の振動による位相変調を与えて参照光波 e_r とし、他方を被測定物体204に照射して物体の深層からの後方散乱光 e_s を得る。被測定物体204が散乱媒質である場合、反射光波は多重散乱を含む乱雑な位相をも

った拡散波面であると考えられる。光コヒーレンス断層画像計測では、光源の低コヒーレンス性により、信号光と参照光の光路長差が光源の μm オーダーのコヒーレント長以内でかつ参照光波と位相相関のある成分、すなわちコヒーレントな信号光成分のみが選択的に参照光波と干渉し合う。それゆえに鏡の位置をスキャンして参照光路長を変化することで光反射分布像を計測することができる。なお、205は光検出器である。

【0006】図11はその光反射分布像を計測する様子を示すものである。

【0007】図11で見られるように、現行の光コヒーレンス断層画像計測は光路長差及び光ビームの走査によって各部位からの反射光波を順次に検出するものである。言い換えれば時間領域の測定法とも理解され、計測時間の短縮には限界がある。画像計測の更なる高速化のために、信号光を空間的に並列検出する測定方法が有効と思われる。

【0008】時間領域での測定を空間領域へ転換して行った例として、光干渉法を用いた超短光パルスの時間波形の計測例がある〔例えば、K. G. Purchase, D. J. Brady, K. Wagner, "Optics Letters", Vol. 18, 2129 (1993) 参照〕。

【0009】図12にその基本原理を示す。超短パルスレーザーからの出力は信号光と参照光に二分割され、それぞれ左側と右側から入射角 θ で光センサアレイの検出面へ入射する。信号パルスと参照パルスの間に時間遅れ

が十分短ければ、両パルスが検出面上にて重畳することになり、光干渉縞を生成する。超短光パルス、特にフェムト秒レーザーパルスのパルス長さは数十 μm にすぎないことから、検出面上における両光波の重畳は局所的であり、それゆえに生成する干渉縞も局所的である。

【0010】上記の測定原理は連続光を用いた光コヒーレンス断層画像計測にも応用できると考えられる。図13に示すように、平面波の信号光 e_s と平面波の参照光 e_r が検出面の中心位置Oに対しそれぞれ左側と右側から検出面へ入射するとすると、検出面における e_s と e_r は以下のように表される。

【0011】

【数1】

$$e_r(t, f, x) = E_r e^{-j(2\pi f t + \phi_r(x))} \quad \dots (1)$$

【0012】

【数2】

$$e_s(t, f, x) = E_s e^{-j(2\pi f t + \phi_s(x))} \quad \dots (2)$$

【0013】但し、 E_r と E_s はそれぞれ参照光と信号光の振幅、 f は光周波数、 $\phi(x)$ は位相である。そこで、検出面で検出される光強度は次のように計算される。

【0014】

【数3】

$$\begin{aligned} I(t, f, x) &= |e_r(t, f, x) + e_s(t, f, x)|^2 \\ &= \frac{1}{2} E_r^2 + \frac{1}{2} E_s^2 + E_r E_s \cos(\Delta\phi(x)) \quad \dots (3) \end{aligned}$$

【0015】この式(3)より光干渉の項は、

【数4】

【0016】

$$i(f, x) = E_r E_s \cos(\Delta\phi(x)) = E_r E_s \cos\left(\frac{2\pi}{c} \Delta L(x)\right) \quad \dots (4)$$

【0017】と求められる。ただし、 $\Delta\phi$ は両光波間の光路長差 ΔL による位相差である。

【0018】一方、図13から、検出面上のある測定点Cから参照光波の等位相面BB'までの距離CE(上付バー)と、同C点から信号光波の等位相面AA'までの距離CD(上付バー)との間の光路長差が次のように与えられる。

【0019】

【数5】

$$\overline{CE} - \overline{CD} = -2\overline{OC} \sin \theta \quad \dots (5)$$

【0020】ただし、 θ は光の入射角である。そこで、参照光波が等位相面BB'までの伝搬距離と、信号光波

が等位相面AA'までの伝搬距離との間の差を Δl とすると、任意の測定点における両光波間の光路長差 ΔL は、上記した式(5)から

【0021】

【数6】

$$\Delta L(x) = \Delta l - 2x \sin \theta \quad \dots (6)$$

【0022】と与えられる。この式(6)を前記式(4)に代入すると、

【0023】

【数7】

$$i(f, x) = E_r E_s \cos\left(\frac{2\pi}{c} (\Delta l - 2x \sin \theta)\right) \quad \dots (7)$$

【0024】になる。スペクトル広がりをもつ光源の場合、この式(7)を光源の周波数分布について積分すればよく、ここでは、計算の便宜上光源の周波数分布関数

$$i(x) = \int_{f_0 - \Delta f}^{f_0 + \Delta f} E_r E_s \cos\left(\frac{2\pi}{c}(\Delta l - 2x \sin \theta)\right) df$$

$$= E_r E_s \text{sinc}\left[\frac{2\pi \Delta f}{c}(\Delta l - 2x \sin \theta)\right] \cos\left[\frac{2\pi f_0}{c}(\Delta l - 2x \sin \theta)\right] \dots (8)$$

【0026】この式(8)は周期 $\lambda_0 / 2 \sin \theta$ ($\lambda_0 = c / f_0$; c : 光の速度)の正弦関数で変調された sinc 関数を表わし、sinc 関数のピーク ($\Delta l - 2x \sin \theta = 0$) が光路長差 Δl に対応している。

【0027】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記した式(8)で表わされる光干渉測定は、フーリエ分光法におけるインターフェログラムの測定〔例えば、河田聡、“分光研究”、第38巻、415(1989)参照〕に類似し、通常フーリエ変換などのデータ演算処理を要する。このような光検出およびデータ演算処理方法は光断層画像計測への応用にとって大変煩瑣であると言える。これを説明するために、上記した図13の測定原理で測定した光干渉縞の結果を図14に示す。実験では、低コヒーレンス光源として中心波長840nm、スペクトル半値幅50nmのSLDを用い、入射角 $\theta = 3.8^\circ$ で信号と参照の両光波を検出面に入射した。

【0028】図14のグラフ(a)は光路長差 $\Delta l = 0$ 、またグラフ(b)と(c)はそれぞれ $\Delta l = 10 \mu\text{m}$ と $\Delta l = 20 \mu\text{m}$ に対応した干渉縞の一次元強度分布である。図14の測定結果から、干渉縞の縞間隔はほぼ理論値 $\lambda_0 / 2 \sin \theta = 6.4 \mu\text{m}$ に等しいことが分かる。ナイキスト(Nyquist)のサンプリング原理から、このような狭い干渉縞を検出するために分解能 $\lambda_0 / 4 \sin \theta = 3.2 \mu\text{m}$ 以上のセンサアレイが必要である。

【0029】本発明は、上記問題点を除去し、光コヒーレンス断層画像計測を有効に空間領域で行うことのできる角分散光空間干渉断層画像化装置を提供することを目的とする。

【0030】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記目的を達成するために、

〔1〕角分散光空間干渉断層画像化装置において、広いスペクトル幅をもつ光ビームを出射する光源と、この光源から出射された光ビームを、被検体が配置される被検体配置位置を経由する信号光と、この被検体配置位置を経由する光路とは異なる光路を経由する参照光とに二分するとともに、前記被検体配置位置を経由した後の信号光と、前記異なる光路を経由した参照光を空間的に交差させることにより、互いに重畳する面上において干渉光を生成する干渉光学系と、前記信号光と前記参照光が重畳する面上に角分散素子を配置し、この角分散素子を透

過もしくは反射する前記信号光および前記参照光を検出面上に結像する光学結像系と、前記光学結像系で結像した干渉光を受光することにより光検出信号を得る光センサと、この光センサが、空間的に配列され、それぞれが独立に受光信号を得る複数の受光素子を有するものであり、さらに、前記光センサで得られた複数の受光信号を統合して前記被検体配置位置に配置された被検体の表面もしくは内部の、前記信号光の伝搬経路上の各関心点に対応する信号を生成する信号処理系とを具備することを特徴とする。

【0025】

【数8】

過もしくは反射する前記信号光および前記参照光を検出面上に結像する光学結像系と、前記光学結像系で結像した干渉光を受光することにより光検出信号を得る光センサと、この光センサが、空間的に配列され、それぞれが独立に受光信号を得る複数の受光素子を有するものであり、さらに、前記光センサで得られた複数の受光信号を統合して前記被検体配置位置に配置された被検体の表面もしくは内部の、前記信号光の伝搬経路上の各関心点に対応する信号を生成する信号処理系とを具備することを特徴とする。

【0031】〔2〕上記〔1〕記載の角分散光空間干渉断層画像化装置において、前記干渉光学系が軸外しマイケルソン干渉計を用いることを特徴とする。

【0032】〔3〕上記〔1〕記載の角分散光空間干渉断層画像化装置において、前記角分散素子が回折格子であり、この回折格子によって1次回折されて出射する前記信号光の中心波長成分と前記参照光の中心波長成分がともに零度もしくは零度に近い出射角をもつことを特徴とする。

【0033】〔4〕上記〔1〕記載の角分散光空間干渉断層画像化装置において、前記干渉光学系が前記被検体へ入射する光ビームをこの光ビームの入射方向と垂直する横方向上線状に絞るために円柱レンズを用い、さらに、この円柱レンズを用いて前記被検体を経由した信号光を集光することを特徴とする。

【0034】〔5〕上記〔4〕記載の角分散光空間干渉断層画像化装置において、前記光センサが、空間的に2次元配列され、それぞれが独立に受光信号を得る複数の受光素子を有するものであり、前記光センサの一方向上で得られた複数の受光信号を統合して前記信号光の伝搬方向上の各関心点に対応する信号を生成するとともに、前記光センサの他の一方向上で得られた複数の受光信号を統合して、前記信号光の伝搬方向と垂直する横方向上の各関心点に対応する信号を生成する信号処理部を構成したことを特徴とする。

【0035】〔6〕上記〔1〕記載の角分散光空間干渉断層画像化装置において、前記干渉光学系が、前記参照光と前記信号光の周波数を相対的にシフトさせる周波数シフタを備えることを特徴とする。

【0036】〔7〕上記〔1〕記載の角分散光空間干渉断層画像化装置において、前記干渉光学系が、被検体への入射光の偏光方向を制御する偏光素子を備えることを特徴とする。

【0037】〔8〕上記〔1〕記載の角分散光空間干涉断層画像化装置において、前記光源が、可干渉距離100 μ m以下のスーパーluminescentダイオードであることを特徴とする。

【0038】〔9〕上記〔1〕記載の角分散光空間干涉断層画像化装置において、前記光源が、可干渉距離100 μ m以下の発光ダイオードであることを特徴とする。

【0039】〔10〕上記〔1〕記載の角分散光空間干涉断層画像化装置において、前記光源が、パルス幅1ピコ秒以下の超短パルスレーザーであることを特徴とする。

【0040】〔11〕上記〔1〕記載の角分散光空間干涉断層画像化装置において、前記被検体が光散乱媒質であることを特徴とする。

【0041】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について説明する。

【0042】本発明は、低コヒーレンス光源の広いスペクトル分布に注目して、角分散素子、例えば、回折格子を用いることにより、上記した光干渉縞の包絡線のみを検出する。

【0043】図1は本発明の原理を示す角分散光空間干涉断層画像化装置の構成図である。

【0044】この図において、1は低コヒーレンス光源、2, 3, 5, 10, 12はレンズ、4はビームスプリッタ(BS)、6は被検体、7は直角プリズム(スキャン可能)、8はバイプリズム、9は回折格子、11は開口、13は光センサアレイである。

【0045】この図に示すように、広いスペクトル幅をもつ低コヒーレンス光源1から出射した光ビームはレンズ2と3によってビーム径の拡大した平行ビームに変換される。その平行ビームをビームスプリッタ(BS)4で信号光 e_s と参照光 e_r に二分する。参照光 e_r と分かれた信号光 e_s はレンズ5によって、例えば散乱媒質からなる被検体6へ収束されて入射する。その被検体6から反射してくる信号光 e_s は再びレンズ5によって集光され、ビームスプリッタ(BS)4へ伝送される。ビームスプリッタ(BS)4は伝送してきた信号光の一部をバイプリズム8へ反射し、そのバイプリズム8から出射する信号光は入射角で回折格子9へ入射する。

【0046】一方、参照光 e_r は直角プリズム7によって全反射され、バイプリズム8へ伝送される。そのバイプリズム8から出射する参照光 e_r は、信号光 e_s とは反対の側から回折格子9へ入射する。ただし、その入射角度は信号光 e_s と同じである。図1に示すように、参照光 e_r と信号光 e_s が回折格子9の面上において互いに重畳する。

【0047】図1は軸外し(off-axis)の光干渉計の原理に基づいて構成されているが、本発明は、次のような機構を光干渉計に備えることにより、従来の軸

外しの光干渉計と異なる特徴をもつ空間干涉断層画像化装置を提供することができる。ここでは、回折格子の格子定数 d を $d = \lambda_0 / \sin \theta$ (λ_0 : 光源の中心波長、 θ : 回折格子の法線に対する入射光ビームの角度)に設定し、その回折格子によって回折されて出射する信号光及び参照光を結像レンズ系で検出面にて結像させる。

【0048】さらに、本発明は検出面に配置される光センサとして、一次元ないし二次元に受光素子を配列されるイメージセンサ、例えばCCD(charge-coupled device)カメラを使用することを特徴とする。

【0049】以下、本発明による光画像測定の実理を説明する。

【0050】図2は、図1に角分散素子として例えば透過型回折格子を用いた場合、その回折光に起きる角分散を示すものである。回折格子が x -軸上に配置され、その法線が y -方向と平行するとすると、入射角 θ の光ビームに対して回折格子からの1次回折光の出射角 β は、回折格子方程式より

【0051】

【数9】

$$\sin \theta + \sin \beta = \lambda / d \quad \dots (9)$$

【0052】と与えられる。そこで、格子定数 d を $d = \lambda_0 / \sin \theta$ (λ_0 : 光源の中心波長)になるように設置すると、前記式(9)より λ_0 に対して $\beta = 0$ になることが明白である。

【0053】一方、 λ_0 以外の波長成分では前記式(9)より回折光の出射角を次のように近似できる。

【0054】

【数10】

$$\Delta \beta = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \sin \theta \quad \dots (10)$$

【0055】図2において、ある出射点Aから入射光波の等位相面OKまでの距離を、AK(上付きバー)とし、また中心点Oから回折光波の等位相面LAまでの距離をOL(上付きバー)とすると、両者の間の距離差が $AK - OL \approx OA \Delta \beta$ [AK, OL, OAともに上付きバー]であることから、回折格子9の角分散による回折光の位相差 $\Delta \phi$ は次のように算出される。

【0056】

【数11】

$$\Delta \phi(\lambda, x) = \frac{2\pi}{\lambda} x \Delta \beta = 2\pi x \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda \lambda_0} \sin \theta \quad \dots (11)$$

【0057】そこで、本発明は図3に示す光学結像系を用いることを特徴とする。図3では、焦点距離 f_1 のレンズ10のフーリエ面に開口を配置することにより、回折格子9からのゼロ次回折光並びに2次以上の高次回折光を除去し、信号光及び参照光の1次回折光のみを光セン

サアレの面上に結像する。

【0058】さらに、信号光波 e_s と参照光波 e_r はそれぞれ左右の両側から回折格子9に入射することから、回折格子9の出射面における参照光の1次回折光と信号光の1次回折光との間の位相差 $\Delta\phi$ を次のように察知できる。

【0059】

【数12】

$$\Delta\phi(\lambda, x) = 2\Delta\phi(\lambda, x) + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta l$$

$$= 4\pi x \frac{\sin\theta}{\lambda_0} + \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta l - 2x \sin\theta) \quad \dots (12)$$

【0060】ただし、 Δl は参照光波 e_r が等位相面E Dまでの伝搬距離と、信号光波 e_s が等位相面C Dまでの伝搬距離との間の差であって、本発明では、例えば図1での直角プリズムの配置位置を参照光波 e_r の入射方向上にスキャンすることにより、被検体の表面から反射してきた信号光 e_s に対して $\Delta l = 0$ になるように設置することが可能である。

【0061】一方、図3に示す光学結像の倍率は $M = f_2 / f_1$ であり、回折格子9の出射面上例えばA点(座標: x)から出射する光は光センサアレ13が配置さ

$$i(f, x) = E_r E_s \cos(\Delta\phi(f, x))$$

$$= E_r E_s \cos\left[-4\pi \frac{f_0}{c} \frac{x \sin\theta}{M} + \frac{2\pi}{c}(\Delta l + 2 \frac{x \sin\theta}{M})\right] \quad \dots (15)$$

【0067】と求められる。スペクトル広がりをもつ光源の場合、この式(15)を光源の周波数分布について積分すればよく、ここでは計算の便宜上光源の周波数分布関数を中心 f_0 、幅 $2\Delta f$ の'top-hat'型と

$$\begin{aligned} i(x) &= \int_{f_0 - \Delta f}^{f_0 + \Delta f} E_r E_s \cos\left[-4\pi \frac{f_0}{c} \frac{x \sin\theta}{M} + \frac{2\pi}{c}(\Delta l + 2 \frac{x \sin\theta}{M})\right] df \\ &= E_r E_s \text{sinc}\left[\frac{2\pi \Delta f}{c}(\Delta l + 2 \frac{x \sin\theta}{M})\right] \cos\left(\frac{2\pi f_0}{c} \Delta l\right) \quad \dots (16) \end{aligned}$$

【0069】この式(16)を前記式(8)と比較すると分かるように、この式(16)は正弦関数で変調されていないsinc関数を表わし、光路長差 Δl に対応して

【0070】

【数17】

$$x = -M\Delta l / (2\sin\theta) \quad \dots (17)$$

【0071】の位置でsinc関数のそのピークが検出される。

【0072】本発明による光画像測定の効果を示すために、図4に示す前記式(16)を用いた計算結果の例を示す。計算では、 $c/f_0 = 0.84\mu\text{m}$ 、 $c/\Delta f = 40\mu\text{m}$ 、 $\theta = 7^\circ$ とし、また、後の前記図14との比較の便宜上 $M = 1$ とした。

【0073】図4に見られるように、光路長差 $\Delta l = 1$

れる検出面上のA'点(座標: $-Mx$)に結像される。従って、検出面に結像する参照光 e_r と信号光 e_s との間の位相差は前記式(12)より次のように与えられる。

【0062】

【数13】

$$\Delta\phi(f, x) = -4\pi \frac{f_0}{c} \frac{x \sin\theta}{M} + \frac{2\pi}{c}(\Delta l + 2 \frac{x \sin\theta}{M}) \quad \dots (13)$$

【0063】ただし、 $f = c/\lambda$ である。前記式(3)と同様に、検出面で検出される光強度は次のように計算される。

【0064】

【数14】

$$\begin{aligned} I(t, f, x) &= |e_r(t, f, x) + e_s(t, f, x)|^2 \\ &= \frac{1}{2} E_r^2 + \frac{1}{2} E_s^2 + E_r E_s \cos(\Delta\phi(f, x)) \quad \dots (14) \end{aligned}$$

【0065】前記式(13)とこの式(14)より光干渉の項は、

【0066】

【数15】

する。

【0068】

【数16】

$0\mu\text{m}$ に対して、検出面 $x = -M\Delta l / (2\sin\theta) = -41\mu\text{m}$ の位置で光干渉強度のピークが検出されている。

【0074】さらに、図4を前記図14の測定結果と比較すると分かるように、本発明は、図3に示すように光学結像の手段を用いて空間干渉縞の包絡線のみを検出し、その包絡線のピーク値を直接読み取ることににより、前記式(17)の対応関係から信号光と参照光との間の光路長差を求めるができる。このことは、検出した光干渉の演算処理により干渉縞の包絡線を求める従来の空間干渉測定と根本的に異なる。

【0075】なお、これまでに角分散素子例えば回折格子によって回折された信号光及び参照光がともに零度の出射角で出射する光画像計測について説明してきたが、回折格子の格子定数 $d \neq \lambda_0 / \sin\alpha$ 、すなわち回折

光が $\beta \neq 0$ の出射角で出射する場合、検出面で検出される干渉光の強度は上記と同様な分析方法から次のように求められる。

$$i(x) = E_r E_s \text{sinc}\left[\frac{2\pi\Delta f}{c}(\Delta l + 2\frac{x \sin \theta}{M})\right] \cos\left(\frac{2\pi f_0}{c} \Delta l + 2\frac{x \sin \beta}{M}\right) \dots (18)$$

【0077】 $\beta \neq 0$ であることから、この式(18)は周期 $\lambda_0 / \sin \beta$ の正弦関数で変調されたsinc関数を表わす。ただし、 $\beta < \theta$ であることから、その周期は前記式(8)で表わされる従来の測定で見られる周期 $\lambda_0 / \sin \theta$ よりも長いことが明白である。

【0078】

【実施例1】図5は、本発明による図1の光計測装置に低コヒーレンス光源として連続出力のスーパーリミネセントダイオード(SLD)を用いた実施例を示す。

【0079】この図において、21は低コヒーレンス光源としてのスーパーリミネセントダイオード(SLD)、22、23、30、32はレンズ、24はビームスプリッタ(BS)、25は円柱レンズ、26は被検体、27は直角プリズム、28はバイプリズム、29は回折光子、31は開口、33は二次元センサアレイである。

【0080】低コヒーレンス光源の可干渉距離 L_c は光源の波長広がり $\Delta \lambda$ に逆比例して $L_c \propto \lambda^2 / \Delta \lambda$ と表すことができる。市販されている近赤外域SLD21の場合 $L_c \approx 50 \mu\text{m}$ 、また発光ダイオード(LED)の場合 $L_c \approx 10 \mu\text{m}$ 程度である。

【0081】さらに、図5の実施例は、本発明による図1の信号光の送信及び受信用レンズ5の代わりに円柱レンズ25を用いることにより、下記のような二次元光断層画像計測を可能にするようにしたものである。

【0082】参照光 e_r と分かれた信号光 e_s は円柱レンズ25によって、例えば散乱媒質からなる被検体26へ入射される。円柱レンズ25は光波を一方向だけに収束するので、被検体26へ入射する信号光 e_s は図5に示すように光伝搬方向(x -)と垂直する横方向

(y -)上に線状に絞られる。被検体26から反射してくる信号光は再び円柱レンズ25によって集光される。その集光された光波は円柱レンズ25の一方向のみの発散性質により平行ビームに変換され、ビームスプリッタ24へ伝送される。

【0083】検出面上に結像される干渉光は二次元センサアレイ33によって検出される。その x -方向上で検出される光信号は本発明による測定原理から被検体26の深さ情報に対応していることが明白である。一方、図5に示すようにセンサアレイ33の y -方向は信号光 e_s の横方向 y -に位置対応している。従って、本実施例は被検体26への入射光を線状に絞り、また干渉光を二次元センサアレイ33で検出することにより、被検体26に関する深さ並びに横方向の情報を同時に取得することができる。すなわち、 x - y 面上の二次元断層画像が

【0076】

【数18】

実時間で計測されることになる。

【0084】さらに、この実施例では、被検体26への入射光もしくは被検体26を z -方向でスキャンすることによって被検体26の内部に関する三次元(3D)画像計測が可能になる。

【0085】

【実施例2】図6は、本発明による図1の光計測装置にビームスプリッタBSとして広帯域偏光ビームスプリッタPBSを用いた実施例である。

【0086】この図において、41は低コヒーレンス光源、42、43、46、51、53はレンズ、44は広帯域偏光ビームスプリッタ(PBS)、45は1/4波長板、47は被検体、48は直角プリズム、49はバイプリズム、50は回折光子、52は開口、54は光センサアレイである。

【0087】低コヒーレンス光源41(例えばSLDとLED)からの出力光は一般的に無偏光、すなわち特定の偏光方向をもたないものである。図6では、PBS44が入射光のS偏光成分を90°反射して参照光 e_r とし、またその入射光のP偏光成分を通過させて信号光 e_s とする。参照光 e_r と分かれた信号光 e_s は1/4波長板45を通過して円偏光に変換され、さらにレンズ46によって収束されて被検体47へ入射する。

【0088】一方、被検体47から反射してきた円偏光の信号光 e_s は再び1/4波長板45を通過することによりS偏光の直線偏光に変換される。PBS44はS偏光の信号光を90°反射してバイプリズム49へ伝送する。このように、回折格子50の面上にて重畳される信号光 e_s および参照光 e_r はともにS偏光である。

【0089】この実施例は、広帯域偏光ビームスプリッタ及び波長板を用いることにより、被検体47への入射光の偏光方向を制御することができる。

【0090】

【実施例3】図7は光ヘテロダイン検出法を本発明へ応用した実施例である。

【0091】この図において、61は低コヒーレンス光源(SLD)、62、63、65、72、74はレンズ、64は第1のビームスプリッタBS1、66は被検体、67は第1のミラー、68は第2のビームスプリッタBS2、69は第2のミラー、69Aはその第2のミラー69を振動させるピエゾ素子PZT、70はバイプリズム、71は回折光子、73は開口、75は光センサアレイである。

【0092】低コヒーレンス光源61例えばSLDからの出力光は第1のビームスプリッタ64によって信号光

e_s と参照光 e_r に二分される。参照光 e_r は第1のミラー67によって90°反射されて第2のビームスプリッタ68へ伝送される。第2のビームスプリッタ68を通過した参照光 e_r は第2のミラー69によって全反射されるが、その反射光は第2のミラー69に付着したピエゾ素子69Aの振動によって位相変調を受ける。第2のビームスプリッタ68は反射光の一部を90°反射して、バイプリズム70へ伝送する。

【0093】この実施例によれば、参照光 e_r が位相変調されていることから、光センサアレイ75によって検出される光干渉信号は位相変調と同じ周波数をもつ交流信号であり、背景光による直流成分から分離することが容易である。

【0094】

【実施例4】図8は、図7の光画像計測装置に光の伝送手段として光ファイバを使用した実施例である。

【0095】この図において、81は低コヒーレンス光源(SLD)、82、88、92、95、96、99、101はレンズ、83、85、87、90、91、94は光ファイバ、84は第1の光ファイバカップラー、86は第2の光ファイバカップラー、89はミラー、89Aはミラー89を振動させるピエゾ素子PZT、93は被検体、97はバイプリズム、98は回折格子、100は開口、102は光センサアレイである。

【0096】低コヒーレンス光源81が例えばSLDからの出力光はレンズ82によって光ファイバ83へ結合される。第1の光ファイバカップラ84は伝送してきた光を参照光と信号光に二分割し、図7における第1のビームスプリッタ64と同様な役割を果たす。

【0097】一方、第2の光ファイバカップラー86は図7の第2のビームスプリッタ68と同様に、参照光の一部をミラー89へ送り、またそのミラー89から反射してくる参照光の一部をバイプリズム97へ伝送する役割を果たす。

【0098】この実施例によれば、光の伝送に光ファイバを使用することにより、被検体93を光画像計測装置から離すことができ、計測上の自由度を大幅に向上する利点がある。

【0099】

【実施例5】本発明によれば、透過型の角分散素子のみならず、反射型の角分散素子も光画像計測に利用できることが明白である。図9は、反射型回折格子110を用いた本発明の実施例である。反射型回折格子110によって一次回折される信号光及び参照光は、図9に示すように、焦点距離 f のレンズ111によって検出面上に結像される。その検出面には干渉光を検出する光センサアレイ112が配置されている。

【0100】この実施例によれば、回折効率の高い反射型回折格子を利用することができる。

【0101】なお、本発明は上記実施例に限定されるも

のではなく、本発明の趣旨に基づいて種々の変形が可能であり、これらを本発明の範囲から排除するものではない。

【0102】

【発明の効果】以上、詳細に述べたように、本発明によれば、以下のような効果を奏することができる。

【0103】(A) 光コヒーレンス断層画像計測を有効に空間領域で行うことができる。

【0104】(B) 低コヒーレンス光源の広いスペクトル分布に注目して、角分散素子、例えば、回折格子を用いることにより、光干渉縞の包絡線のみを検出することができる。

【0105】(C) 被検体への入射光もしくは被検体を z -方向でスキャンすることによって被検体の内部に関する三次元(3D)画像計測が可能になる。

【0106】(D) 広帯域偏光ビームスプリッタ及び波長板を用いることにより、被検体への入射光の偏光方向を制御することができる。

【0107】(E) 参照光が位相変調されていることから、光センサアレイによって検出される光干渉信号は位相変調と同じ周波数をもつ交流信号であり、背景光による直流成分から分離することが容易である。

【0108】(F) 光の伝送に光ファイバを使用することにより、被検体を光画像計測装置から離すことができ、計測上の自由度を大幅に向上することができる。

【0109】(G) 回折効率の高い反射型回折格子を利用することができ、精度の高い三次元(3D)画像計測が可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】マイケルソン干渉計を用いた光コヒーレンス断層画像計測装置の基本構成を示す図である。

【図2】図1に角分散素子として例えば透過型回折格子を用いた場合、その回折光に起きる角分散を示す図である。

【図3】本発明の光学結像系を用いる角分散光空間干渉断層画像化装置を示す図である。

【図4】本発明による光画像測定の効果を示す信号強度を示す図である。

【図5】本発明による図1の光計測装置に低コヒーレンス光源として連続出力のスーパーluminescentダイオード(SLD)を用いた実施例を示す図である。

【図6】本発明による図1の光計測装置にビームスプリッタBSとして広帯域偏光ビームスプリッタPBSを用いた実施例を示す図である。

【図7】光ヘテロダイン検出法を本発明へ応用した実施例を示す図である。

【図8】図7の光画像計測装置に光の伝送手段として光ファイバを使用した実施例を示す図である。

【図9】反射型回折格子を用いた本発明の実施例を示す図である。

【図10】マイケルソン干渉計を用いた光コヒーレンス断層画像計測装置の基本構成を示す図である。

【図11】図10による光反射分布像を計測する様子を示す図である。

【図12】従来の測定の基本原則を示す図である。

【図13】従来の測定原理の詳細な説明図である。

【図14】図13の測定原理で測定した光干渉縞の結果を示す図である。

【符号の説明】

1, 41 低コヒーレンス光源
2, 3, 5, 10, 12, 22, 23, 30, 32, 42, 43, 46, 51, 53, 62, 63, 65, 72, 74, 82, 88, 92, 95, 96, 99, 101, 111 レンズ
4, 24 ビームスプリッタ (BS)
6, 26, 47, 66, 93 被検体
7, 27, 48 直角プリズム (スキャン可能)
8, 28, 49, 70, 97 バイプリズム
9, 29, 50, 71, 98 回折格子
11, 31, 52, 73, 100 開口

13, 54, 75, 102, 112 光センサアレイ
21, 61, 81 低コヒーレンス光源 [スーパー
ミネセントダイオード (SLD)]

25 円柱レンズ

33 二次元センサアレイ

44 広帯域偏光ビームスプリッタ (PBS)

45 $1/4$ 波長板

64 第1のビームスプリッタ (BS1)

67 第1のミラー

68 第2のビームスプリッタ (BS2)

69 第2のミラー

69A 第2のミラー69を振動させるピエゾ素子PZT

83, 85, 87, 90, 91, 94 光ファイバ

84 第1の光ファイバカプラー

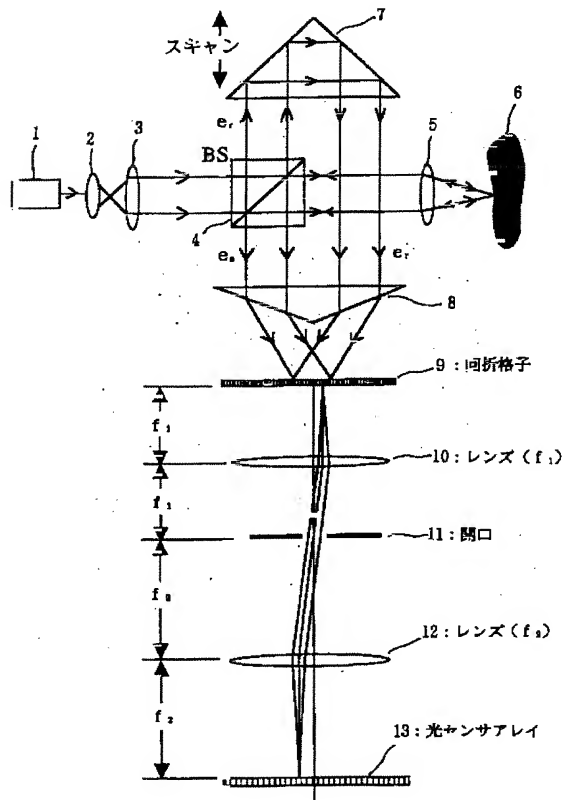
86 第2の光ファイバカプラー

89 ミラー

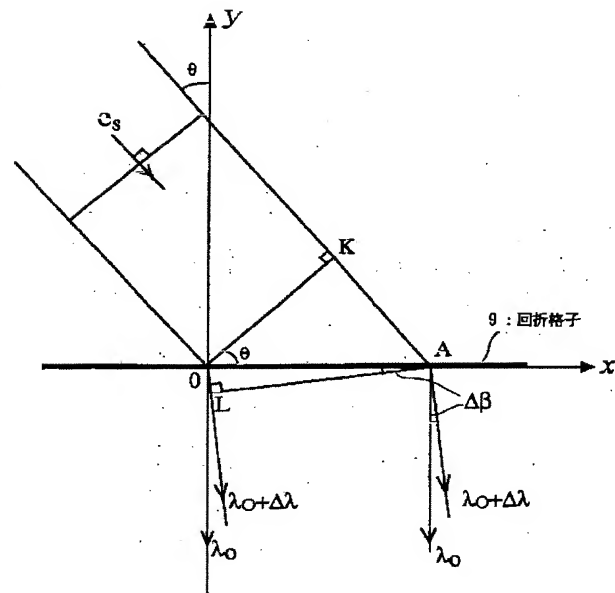
89A ミラー89を振動させるピエゾ素子PZT

110 反射型回折格子

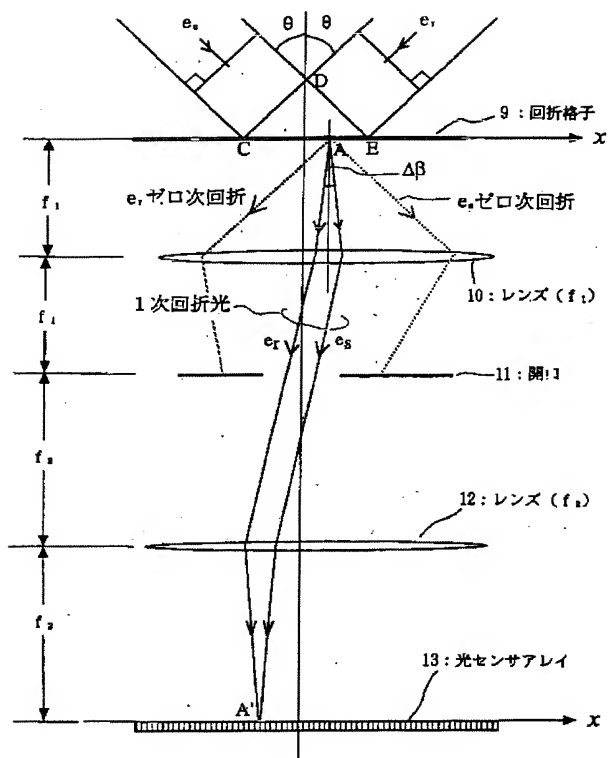
【図1】



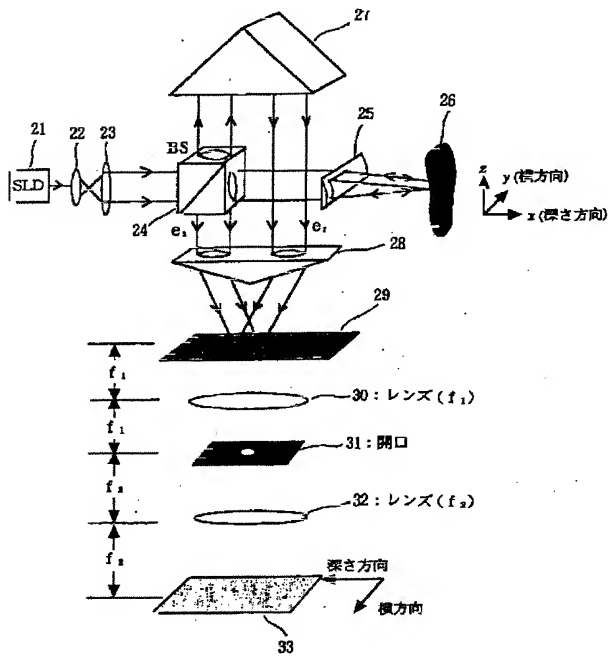
【図2】



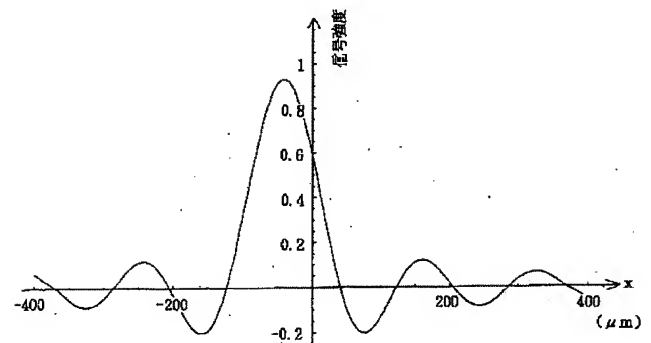
【図3】



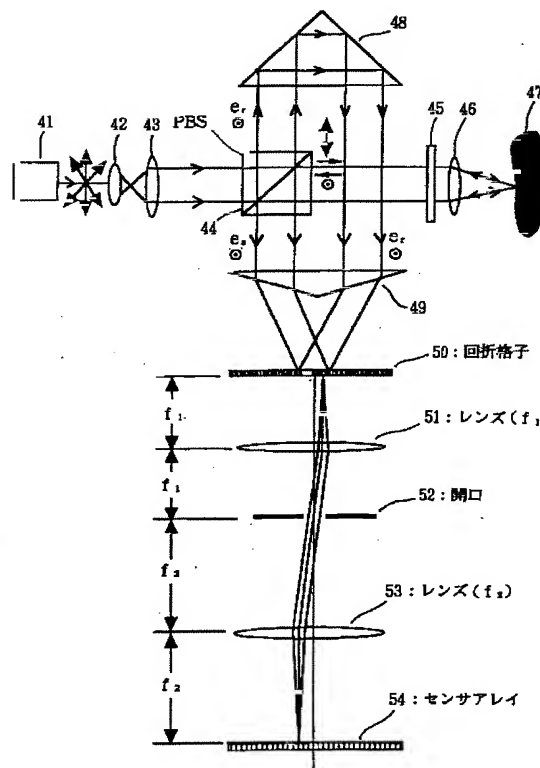
【図5】



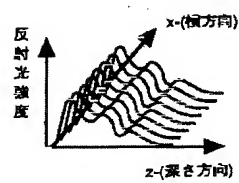
【図4】



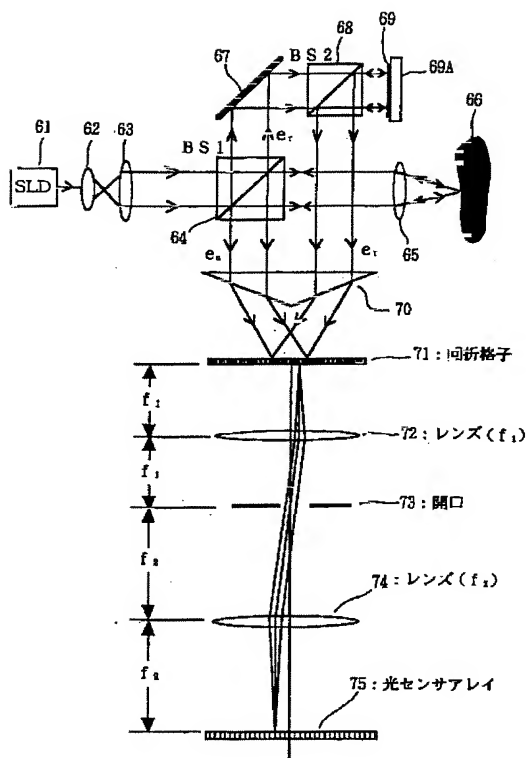
【図6】



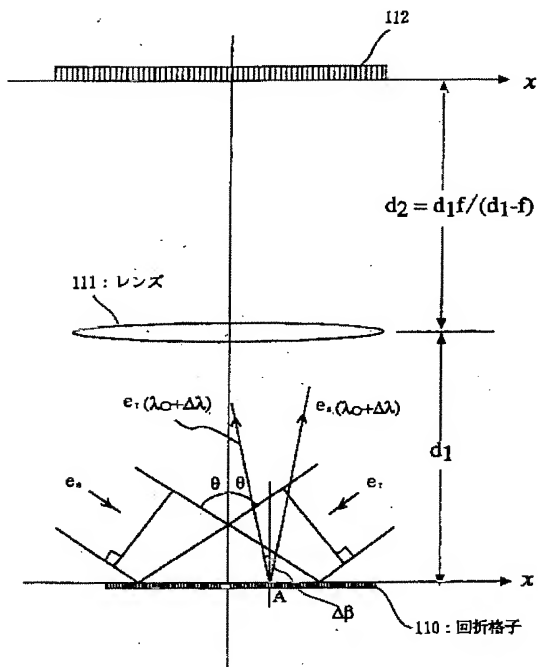
【図11】



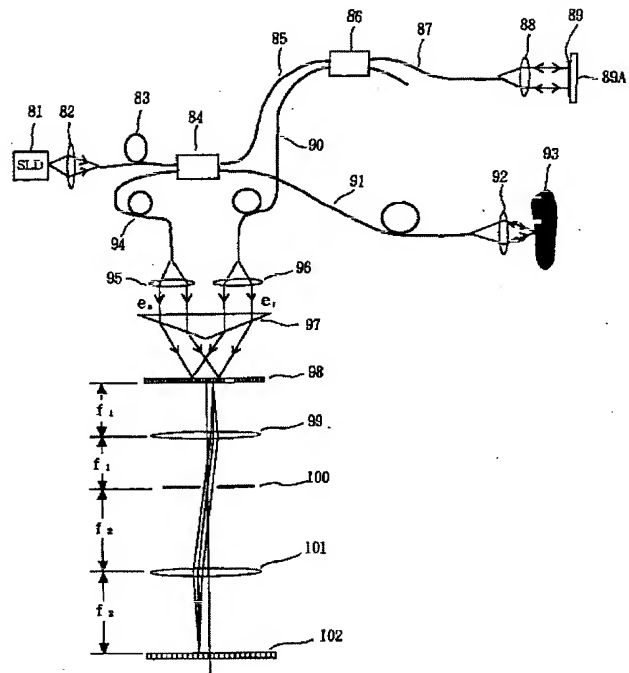
【図7】



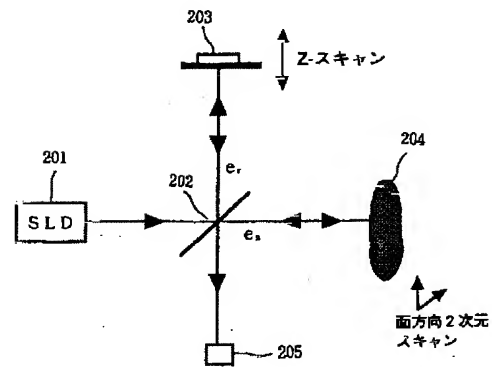
【図9】



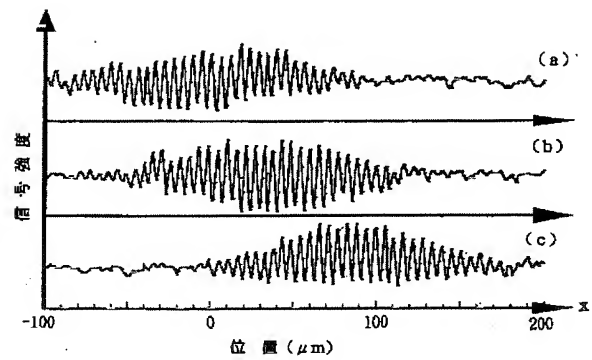
【図8】



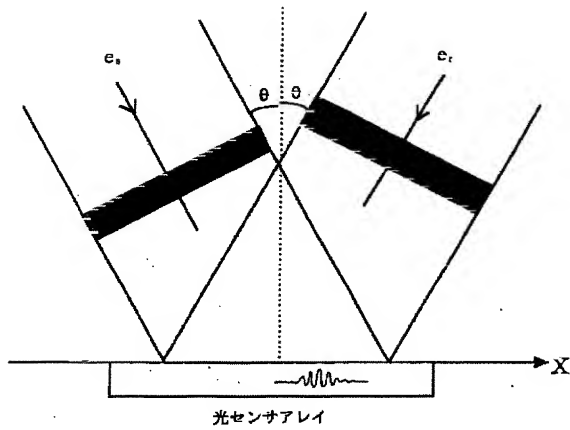
【図10】



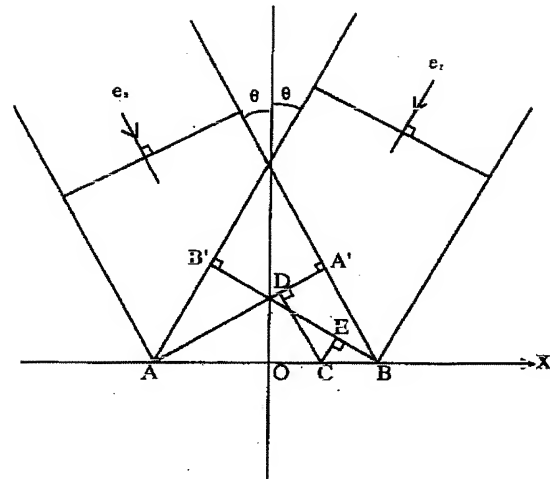
【図14】



【図12】



【図13】



フロントページの続き

(72)発明者 丹野 直弘
山形県山形市松見町15-27

Fターム(参考) 2F065 AA52 AA53 BB05 DD03 DD04
FF01 FF52 GG00 GG04 GG07
HH03 HH13 JJ03 JJ26 KK01
LL00 LL02 LL30 LL36 LL37
LL42 LL46 LL57 MM02 NN05
NN08 QQ01 SS13 UU07
2G059 AA05 BB12 EE02 EE05 EE09
FF02 GG02 GG06 JJ05 JJ11
JJ12 JJ15 JJ17 JJ19 JJ20
JJ22 JJ30 KK04 LL01